

(Aus der Universitäts-Augenklinik Basel [Direktor: Prof. Dr. A. Brückner].)

Das stereoskopische Sehen des hell- und dunkeladaptierten Auges

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Medizinischen Fakultät
der Universität Basel

vorgelegt von

August Guggenbühl

von Zürich und Meilen

Basel 1948



VERLAG VON S. KARGER IN BASEL

Von der Medizinischen Fakultät Basel genehmigt
auf Antrag von Prof. Dr. A. Brückner.

Tag der Promotion: 9. November 1946.



Einleitung.

Die bisherigen Untersuchungen über das Tiefensehen wurden fast ausschließlich bei hell-adaptiertem Auge vorgenommen. Hierüber existieren sehr viele, zum Teil schon ziemlich weit zurückliegende Abhandlungen, die nicht näher aufgeführt werden sollen. Hingegen sind in der Literatur nur zwei Arbeiten zu finden über das stereoskopische Sehen bei Dunkeladaptation, und zwar eine von W. A. Nagel, die andere von Streckfuß. Während Nagel, der mit der Heringschen Stäbchenmethode arbeitete, nur wenige Versuche und diese lediglich zum Zwecke einer allgemeinen Orientierung gemacht zu haben scheint, hat der zweite Autor mit der Stufenmethode von Monje ausgedehnte Versuchsreihen angestellt und dabei auch die Beziehungen der Tiefensehschärfe zu der angularen Sehschärfe näher erforscht.

Die vorliegenden Untersuchungen knüpfen an diejenigen von Gaus (siehe Ophthalm. Vol. 112, Nr. 4/5, 1946) an. Es erübrigt sich deshalb, im einzelnen näher auf die Verhältnisse beim Tiefensehen, die ja als allgemein bekannt vorausgesetzt sind, einzugehen. Auch die Methodik soll nur so weit besprochen werden, als sie in wesentlichen Punkten von derjenigen von Gaus abweicht.

Methodik.

Wir verwendeten für unsere Untersuchungen den gleichen Apparat, den Gaus nach den Angaben von Monje erstellt hatte. Seine Beschreibung findet sich bei Gaus.

Während aber diese beiden Autoren bei Tagesbeleuchtung arbeiteten, benützten wir künstliches Licht. Zu diesem Zwecke wurde etwa 8 cm hinter der Fadenebene ein Opalglas aufgestellt, von dem eine 80 cm lange und 16 cm im Diameter messende schwarze Pappröhre zu der Lichtquelle führte. Diese bestand aus einer 40-W-Tageslichtlampe und war etwa 15 cm in die Papp-

röhre eingestülpt. Wir wählten eine Distanz von 65 cm zwischen Lichtquelle und Opalglas, da wir bei dieser empirisch gefundenen Entfernung ohne allzu großen Helligkeitsverlust eine gleichmäßige Beleuchtung des Gesichtsfeldes erzielten und damit Helligkeitsunterschiede in ihm, die sich hauptsächlich beim Abdrosseln des Lichts störend bemerkbar machten, fast völlig ausschalten konnten. Bei Helladaptation arbeiteten wir mit maximal erleuchtetem Gesichtsfeld. Bei den Dunkelexperimenten stellten wir die Widerstände auf eine bestimmte Stärke so ein, daß die Lichtintensität im Gesichtsfeld bis zur Grenze der Sichtbarkeit der Fäden herabgesetzt wurde.

Aus äußeren Gründen war es nicht angängig, die Versuche bei Helladaptation in einem mit Tageslicht erleuchteten Raume auszuführen, so daß nicht ein maximaler Grad von Helladaptation bei diesen Versuchen vorgelegen hat. Bei den stets anschließenden Dunkelversuchen war aber der Unterschied so eklatant, daß die Resultate gleichwohl als repräsentativ angesehen werden können.

Wir sind uns wohl bewußt, daß damit keine genauen physikalischen Versuchsbedingungen gegeben sind. Faktoren wie Netzschwankungen, die bekanntlich die Spannung bis zu 10% verändern können, Erwärmung der Widerstände nach längerem Gebrauch und damit Verminderung der Stromdurchlässigkeit, machen es fast unmöglich, eine konstante Beleuchtungsintensität von genau umschriebener Stärke herzustellen. Ebenso weist die Dunkelbeleuchtung etwas mehr langwelliges Licht auf, als dies bei der natürlichen Dämmerung der Fall ist, weil das Licht der Lampen beim Abdrosseln des Stromes rötlich wird. Doch sind durch die Einwirkungen dieser Faktoren grundlegende Änderungen nicht zu erwarten.

Die Versuche wurden in einem 5 : 4,5 m messenden und 3 m hohen, gleichmäßig hellgrau gestrichenen Zimmer angestellt, das vollständig vom natürlichen Licht abgeschlossen war. Während der Hellversuche wurde der Raum durch eine 150-W-Lampe stark erleuchtet. Bei den Versuchen im Dämmerungslicht erzeugte eine 75-W-Lampe, die durch einen Widerstand von 700 Ohm herabgedrosselt wurde, eine etwa dem Beobachtungsfeld entsprechende Beleuchtung. Um das dabei entstehende rötliche Licht etwas auszuschalten, wurde die Lampe mit schwarzer Seide umwickelt und gleichzeitig noch eine ebenfalls umhüllte, blaue Verdunkelungslampe eingeschaltet. Das Licht fiel schräg von hinten auf die Versuchsperson (VP.), gelangte also nicht in ihre Augen.

Monje beschrieb, ebenso wie *Gaus*, zwei prinzipiell verschiedene Arten der Untersuchung. Entweder veränderte er die Fadenstellung kontinuierlich, oder er bot der VP. verschiedene über- und unterschwellige Werte und bestimmte den Winkel durch Einengen. Die erste Methode nannte er Gleit-, die zweite Stufenmethode und benutzte jene mehr zu systematischen, quantitativen Untersuchungen, diese zur qualitativen Vorbestimmung.

Wir arbeiteten nach der Gleitmethode und stellten bei senkrechter Fadenstellung den Abstand des Mittelfadens unter Beobachtung der VP. ebenfalls gleitend ein. Diese Methode dürfte sich von jener, wo der Winkel gleitend vergrößert wird, in prinzipiellen Punkten unterscheiden. Sie wurde bei den Versuchen mit exzentrischer Beobachtung ausschließlich verwendet. Alle unsere Resultate wurden durch gleitende Einstellung der Schwelle gefunden, sowohl bei der Gleitmethode nach *Monje* (gleitende Vergrößerung des Win-

kels bei konstantem Abstand des Mittelfadens von der Fadenebene), als auch bei der Methode nach *Hering* (gleitende Verschiebung des Mittelfadens nach vorn oder hinten bei konstanter Winkelstellung der Fäden).

Als VP. wurden Assistenten, Laborantinnen und Schwestern der Klinik herangezogen, die z. T. schon bei den Versuchen von *Gaus* mitgewirkt hatten, also eine gewisse Übung besaßen. Sie hatten die Aufgabe, auf Aufforderung des Versuchsleiters (VL.) ihren Blick, den sie zwischen den einzelnen Bestimmungen auf die Pappröhre gerichtet hielten, den Fäden zuzuwenden, und, sobald sie einen Tiefenabstand des nun in Bewegung gesetzten Mittelfadens erkannt hatten, dies mit «vorn» oder «hinten» zu melden. Der VL. hielt in diesem Moment mit der gleitenden Bewegung inne und protokollierte den gefundenen Schwellenwert.

Nach den Hellversuchen, die 20–30 Minuten dauerten, wurde sofort die Lichtstärke auf das für die Dunkelversuche erforderliche Maß herabgesetzt und mit den Dunkelversuchen begonnen. Bei den ersten Beobachtungen war natürlicherweise ein Urteil nicht möglich, weil noch eine unzureichende Anpassung an die herabgesetzte Beleuchtung bestand. Aber schon nach wenigen Minuten ließen sich die Versuche einwandfrei durchführen.

Die angegebenen Zahlen sind bei Tab. I Mittelwerte aus je 50, bei Tab. II für 90° und 10° aus je 20, für 45° und 30° aus je 40, bei Tab. III für alle Abstände aus je 10 und bei Tab. IV aus je 50 Einzelversuchen.

Auf den Allgemeinzustand, die Disposition, Ermüdung und andere in Betracht kommende Faktoren wurde geachtet. Von nachweisbarem Einfluß waren diese aber nicht. Ametropen wurden voll auskorrigiert; sämtliche VP. besaßen normale Sehschärfe. Die Kontrolle über eine ausreichende Dunkeladaptation wurde durch den Ausfall der Farbenwahrnehmung mit Hilfe kleiner, farbiger Papierflächen durchgeführt. Die Versuche erstreckten sich auf Beobachtungen im direkten und indirekten Sehen, sowohl bei Hell- als auch Dunkeladaptation, wobei die Aufgabe gestellt war, den Unterschied bezüglich der Tiefenerkennung bei Tages- und Dämmerungssehen zu ermitteln.

Um die Realität der Differenzen der Versuchsergebnisse zu beweisen, wurde nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung über die mittlere quadratische Abweichung (Sigma) der mittlere Fehler des Durchschnittes (m) für Tabelle I und IV bestimmt, aus diesem hierauf das Mittel der Differenz der beiden m der verglichenen Reihen (m Diff.) ausgerechnet. Es zeigte sich, daß die Multiplikation von m Diff. mit 3 eine kleinere Zahl ergibt als die Differenz der arithmetischen Mittel (D) der verglichenen Reihen (hell, dunkel), demnach die Wahrscheinlichkeit, daß es sich um versuchsbedingte Unterschiede zwischen den Hell- und Dunkelwerten und nicht um zufällige Streuung handelt, über 99,73% ist. Dasselbe ist der Fall für die Unterschiede zwischen vorn und hinten in Tabelle I, während für Tabelle IV diese Wahrscheinlichkeit nicht erreicht wird.

Theoretisches. Da die Fäden 34 cm vor dem Auge der VP. und 1 cm voneinander entfernt waren, betrug der Winkel von Faden zu Faden ca. 1° 40'. Ihr Bild fiel demnach, bei einer Ausdehnung der Fovea von 2°, fast vollständig in deren Bereich, also in das Gebiet der maximalen Sehschärfe. Da nun nach *Monje* bei wachsendem Seitenabstand der Fäden der minimale Tiefenschwellenwert ansteigt, werden die dem Fixierpunkt zunächst ge-

legenden Partien der Seitenfäden zuerst den Eindruck der Tiefe vermitteln. Diese Punkte liegen aber in der Blickebene, also im Müllerschen Horopterkreis, während die entfernteren Teile der Seitenfäden aus dem Querhoropter herausfallen, längsdisparat werden und Doppelbilder ergeben. Wenn wir nun den Mittelfaden nach vorn oder hinten verschieben, so gleiten die seitlichen Fäden relativ zu diesem in entgegengesetzter Richtung, und es ergibt sich deshalb unmittelbar bevor die in der Blickebene liegenden Partien der Seitenfäden doppelt gesehen werden, ein stereoskopischer Effekt bei bestimmter minimaler Querdissparation, deren zugehörigen Winkel wir anhand des gefundenen Schwellenabstandes berechnen können.

Da nun nach *Monje*, *Gaus* und andern die Größe der Schwellen durch Adaptation des Sehapparates an den Raumeindruck von der zeitlichen Exposition abhängig ist — Unterschied zwischen Gleit- und Stufenmethode —, muß auch die Geschwindigkeit, mit welcher die Schwelle überschritten wird, einen Einfluß auf deren Wert haben, und zwar sollte theoretisch der bei gleitender Einstellung gefundene Abstand (A) mit zunehmender Verschiebungsgeschwindigkeit etwa mit dem ctg bis auf die mit der Stufenmethode gefundene Schwelle absinken, da offenbar der Quotient dA/dt für die Bildung des stereoskopischen Effektes bei der Gleitmethode mitverantwortlich ist. Mit zunehmender Geschwindigkeit spielen aber die Reaktionszeiten der VP. und des VL. eine steigende Rolle und vergrößern den Schwellenwert. Die Beeinflussung des Tiefenabstandes durch die Gleitgeschwindigkeit sollte sich theoretisch also wie folgt verhalten: Bei sehr kleiner Geschwindigkeit durch Adaptation an den Raum: große Schwellenwerte; Absinken mit steigender Geschwindigkeit bis zu einem gewissen Minimalwert; dann allmählicher Wiederanstieg infolge der sich immer stärker auf den Schwellenabstand auswirkenden Reaktionszeiten.

Wir verwendeten in unsern Versuchen zwei verschiedene Geschwindigkeiten, die sich empirisch als die geeignetsten erwiesen. Für die Hellversuche wurde die Schwelle von 0,5 mm innerhalb 3 sec eingestellt, bei Dunkelheit brauchten wir für 2,5 mm 10 sec. Die beiden Geschwindigkeiten verhalten sich also wie 2 : 3. Wie wir aber aus einer zu Orientierungszwecken angelegten Kurve, die uns die Schwellen als Funktion der Gleit- bzw. Drehgeschwindigkeit wiedergab, ersehen konnten, sind die dabei sich ergebenden Differenzen, wenigstens bei Hellversuchen, so gering, daß wir eine Korrektur der Werte nicht für nötig erachten.

Um die Exploranden an den Apparat zu gewöhnen und allfällige andere Einflüsse, wie z. B. Ermüdung, Übung, Disposition festzustellen, machten wir zwei voneinander unabhängige Versuchsreihen, wovon die erste nur zu Vergleichszwecken herangezogen, zur Berechnung der Mittelwerte aber nicht benützt wurde. Die Ergebnisse sind interessant. Während bei den Hellversuchen fast durchwegs eine Herabsetzung der Schwelle zwischen der ersten und zweiten Versuchsreihe um oft mehr als das Dreifache zu konstatieren war, ist eine solche bei den Versuchen mit Dunkeladaptation nur bei 6 von 10 VP. vorhanden und prozentual geringer, während bei 4 Exploranden die Schwelle sogar anstieg. Es scheint also, daß bei Helladaptation sich die Übung viel rascher einstellt als beim Dämmerungssehen.

Versuche im direkten Sehen.

1. Versuchsanordnung: Gleitende Verschiebung des Mittelfadens bei konstantem Winkel (Vertikalstellung).

In unserer ersten Versuchsanordnung bestimmten wir mit dem Apparat von *Monje* bei senkrechter Fadenstellung den Schwellenwert des Tiefenabstandes, den die Versuchsperson bei gleitender Verschiebung des Mittelfadens durch den VL. mit «vorn» oder «hinten» angab. Betrachtet man die Resultate der Tabelle I, so wird ersichtlich, daß der Schwellenwert bei dieser Anordnung für Helligkeit 0,57 mm bzw. 0,85 mm beträgt; was einem Grenzquerdisparationswinkel von 10'' bzw. 15'' entspricht. Er ist also ungefähr gleich groß wie derjenige, den *Hofmann* angibt. Nach ihm beträgt nämlich der minimale Winkel, bei welchem noch ein stereoskopischer Effekt vorhanden ist, 8'' bis 12''.

TABELLE I.

Schwellenwerte bei gleitender Verschiebung des senkrechten Mittelfadens im direkten Sehen (Methode nach Hering). Mittelwerte von je 50 Vorn- und Hintenstellungen.

Nr.	VP.	Hell		Dunkel	
		Vorn mm	Hinten mm	Vorn mm	Hinten mm
1.	S. 20 J. w.	0,42	0,47	1,66	1,77
2.	Ro. 20 J. w.	0,63	1,11	4,53	7,21
3.	E. 20 J. m.	0,91	1,04	2,67	5,03
4.	W. 21 J. m.	0,39	0,87	2,41	2,79
5.	K. 25 J. w.	0,68	0,87	2,71	2,79
6.	Gu. 27 J. m.	0,43	0,59	1,17	2,06
7.	F. 28 J. w.	0,76	1,13	3,21	3,08
8.	Ga. 29 J. m.	0,54	0,79	2,60	3,68
9.	St. 36 J. w.	0,66	0,84	2,94	2,42
10.	H. 40 J. w.	0,37	0,65	1,85	2,29
11.	B. 45 J. w.	0,64	0,60	3,41	2,96
12.	G. 27 J. m.	0,50	0,86	2,17	4,58
13.	Sch. 33 J. m.	0,59	1,22	3,55	4,18
Mittelwerte:		0,57	0,85	2,58	3,42

$$\text{Quotient:} \left(\frac{\text{Dunkelschwelle}}{\text{Hellschwelle}} \right) \quad \begin{array}{cc} \text{Vorn} & \text{Hinten} \\ 4,53 & 4,02 \end{array}$$

m. = männlich

w. = weiblich

NB.: In den nachfolgenden Tabellen: M. = Mittelwerte

$$Q. = \text{Quot.} \frac{\text{Dunkelschwelle}}{\text{Hellschwelle}}$$

Für die VP. wurden lediglich die Nrn. angeführt.

Bei Dunkeladaptation liegt die Schwelle um den 4- bzw. 4,5-fachen Betrag höher, d. h. 2,6 mm bzw. 3,4 mm. Der zugehörige Querdiparationswinkel beträgt demnach für die Verschiebung nach vorn 47'', für eine solche nach hinten 61''.

Ferner konstatiert man eine deutlich niedrigere Schwelle bei Vornstellung des Mittelfadens als bei seiner Verschiebung nach hinten. Es hängt dies nicht von der Tatsache ab, daß bei gleicher Verschiebung der Querdiparationswinkel bei Vornstellung etwas größer wird, da die Differenzen zu gering sind, um ursächlich in Betracht zu fallen, sondern die Erklärung soll nach *Monje* vielmehr darin zu suchen sein, daß die Mehrzahl der Menschen infolge Netzhaut-Asymmetrien eine physikalisch frontalparallele Ebene als konvex oder konkav empfindet, was ein rascheres Erkennen der Schwellen bei Hinten- bzw. Vornstellung der Fäden zur Folge habe.

In unseren Tabellen sind die VP. in der Reihenfolge ihres Alters (außer Nr. 12 und 13 der Tabelle I) geordnet. Irgendein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen diesem und der Tiefensehschärfe scheint aber, wie man sehen kann, nicht vorzuliegen. Was die Disposition anbelangt, so ist zu sagen, daß beim Dämmerungssehen, wo die Schwelle schwer zu erkennen und deshalb eine größere Leistung erforderlich ist, diese einen viel bedeutenderen Einfluß hat als bei Helladaptation. Ebenso verändert auch die Pupillardistanz, die wir gesondert betrachtet haben, wenigstens bei unsern Exploranden, die Schwelle nicht merklich, etwa in dem Sinne, daß mit dem Größerwerden des Augenabstandes das stereoskopische Sehen feiner würde. Es scheinen hier andere, individuell verschiedene Faktoren die theoretisch zu fordernde Beziehung stark in den Hintergrund zu drängen.

Bei einer VP. konnten die Dunkelversuche nicht exakt durchgeführt werden, und zwar bei Explorand 13. Dieser sah nämlich fortwährend Doppelbilder. In seinem Blickfeld entstanden zuweilen 4 oder sogar 5 Fäden, die gleich gefärbt, parallel und in gleichem Abstand zu den übrigen gesehen wurden. Es handelte sich hier, wie wir nachträglich feststellen konnten, um eine

latente Heterophorie von etwas über 6° , die bei der infolge Dunkelbeleuchtung schwierigen Akkommodation in Erscheinung trat. Von den 6 dabei entstehenden Fadenbildern konnten je nach der Lichtintensität 1 bis 2, evtl. auch alle miteinander zur Dekkung gebracht werden. Diese Abnormität war dem Exploranden (einem Ophthalmologen) bis jetzt noch nie aufgefallen. In der Anamnese gab er an, als 8—9jähriger einmal eine ziemlich schwere contusio bulbi durchgemacht zu haben.

2. Versuchsanordnung: Gleitende Verschiebung des Mittelfadens bei konstantem, verschieden groß gewähltem Winkel, unter dem die Fäden dargeboten werden.

Um über den Einfluß des Winkels auf die Schwelle etwas zu erfahren, wurden Bestimmungen mit verschiedenen Schrägstellungen der Fäden (90° , 45° , 30° , 10°) von der Horizontalen bei Dunkel- und Helladaptation, im übrigen aber gleich wie bei Versuchsreihe 1 bei gleitender Verschiebung des Mittelfadens durchgeführt.

Es zeigt sich, wie aus Tabelle II ersichtlich ist, daß mit zunehmender Abweichung von der Senkrechten die Schwellen sowohl bei Hell- wie bei Dunkeladaptation höher werden. Auch hier wieder erweist es sich, daß die Stellung nach vorn niedrigere, diejenige nach hinten höhere Werte ergibt. Bemerkenswert ist, daß die Schwellen bei 90° niedriger als bei Tabelle I sind, was wohl auf die zunehmende Übung der VP. zu beziehen ist, zumal bei den Versuchsreihen der Tab. II die Versuche bei Vertikalstellung jeweilen am Schluß vorgenommen wurden. Der Einfluß der Ermüdung dürfte demnach trotz der Länge der Versuchsreihe (bis zu $1\frac{1}{2}$ Std.) nicht wesentlich sein. Die Versuche bei der 10° -Stellung der Fäden waren für die VP. sehr anstrengend, so daß oft Pausen eingeschaltet werden mußten. Auch war die Streuung bei den kleineren Winkeln viel größer, was in den vielen Verkennungen zum Ausdruck kam. Insbesondere aber zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Schwellen von der Gleitgeschwindigkeit, der Disposition, der Erwartung und der Perseveration des vorangegangenen Tiefeneindrucks.

Interessant ist auch eine Bemerkung der VP. 9, nach welcher die Fäden bei Nullstellung nicht in einer frontal parallelen, sondern in einer Kugelebene zu liegen scheinen, deren konvexer Teil ihr zugekehrt war. Es würde dies die bestehende größere Diffe-

TABELLE II.

Schwellenwerte bei gleitender Verschiebung des Mittelfadens im direkten Sehen und verschiedener Schrägstellung der Fäden. Mittelwerte aus je 40 Vorn- und Hintenstellungen bei 45° und 30°, aus je 20 Vorn- und Hintenstellungen bei 90° und 10°.

VP.	Hell				Hinten			
	90° mm	Vorn 45° mm	30° mm	10° mm	90° mm	45° mm	30° mm	10° mm
1.	0,53	0,83	1,06	1,34	0,65	0,79	1,04	1,55
2.	0,41	0,82	0,97	2,87	1,06	1,47	1,62	2,26
3.	0,43	0,88	1,02	3,09	0,87	1,24	1,16	4,15
4.	0,44	0,47	0,63	1,74	0,55	0,60	0,81	1,89
5.	0,46	0,59	0,59	2,79	0,65	0,83	0,86	2,90
6.	0,46	0,67	0,86	1,14	0,65	0,83	0,98	2,08
7.	0,72	1,34	1,88	2,98	1,14	1,35	1,69	2,84
8.	0,55	0,88	1,02	1,33	0,54	0,91	1,19	2,14
9.	0,61	0,76	0,97	1,81	0,81	0,93	1,23	1,91
10.	0,54	0,81	0,97	1,39	0,77	1,16	1,11	2,32
M. =	0,52	0,80	0,997	2,08	0,76	0,99	1,14	3,35
Dunkel								
1.	1,63	2,42	3,08	6,73	1,58	2,04	2,57	5,99
2.	2,55	4,83	7,05	- u -	5,60	4,10	7,78	- u -
3.	1,55	2,60	3,53	6,56	3,11	3,98	5,07	9,98
4.	2,57	4,81	5,78	10,40	3,03	5,73	6,63	10,54
5.	1,83	3,69	3,28	6,48	3,10	3,01	3,13	9,04
6.	1,56	2,66	3,16	4,65	2,33	3,24	3,99	5,63
7.	2,58	4,56	5,79	9,73	2,87	4,09	6,05	6,94
8.	—	3,20	3,16	6,83	—	2,51	2,98	6,40
9.	1,74	2,25	2,60	4,72	2,07	2,39	3,11	7,05
10.	1,82	2,79	3,80	4,54	2,28	3,66	3,85	5,09
M =	1,94	3,23	3,95	6,58	2,75	3,45	4,29	7,20
—u— = unerschwellige Werte. (Die Schwelle konnte auch bei maximaler Verschiebung [12 mm] nicht erreicht werden.)								
— = Keine Versuche.								
Q =	3,73	4,04	3,96	3,17	3,62	3,49	3,76	2,15

renz zwischen Vorn- und Hintenstellung bei einem Winkel von 10° durch Akzentuierung des physiologischen Unterschiedes erklären. Bei der Kleinwinkelstellung der Fäden (10°) wird es auch offensichtlich, daß bei Dunkelheit parazentral und nicht zentral beobachtet wird. Fast alle VP. gaben nämlich an, daß die sonst erkannten Unterschiede (Schwellenwerte) bei genauem Fixieren verschwanden, hingegen wieder zum Vorschein kamen, sobald

der Explorand seine Aufmerksamkeit nicht dem Zentrum des Mittelfadens, sondern dem Gesichtsfelde als Ganzem zuwendete.

Suchen wir für die Zahlen der Tabelle II den gesetzmäßigen Ausdruck, so finden wir ihn in der Formel $A = k' + k'' \cdot \operatorname{ctg} \alpha$; wobei k' der minimalen Schwelle bei senkrechter Fadenstellung (0,52 mm), $k'' = 0,27$ mm entspricht. A = Schwellenabstand, α = Winkel, den die Fäden mit der Horizontalen bilden. Wenden wir die gleiche Formel für die Resultate bei Dunkelheit an, dann müssen wir bei k' von 1,94 mm k'' ca. 1 werden lassen, um die Größen in einer Formel ausdrücken zu können. k'' verändert sich also bei Dunkelheit im gleichen Verhältnis wie k' , nämlich um das 3,7-fache, und wir können deshalb für k'' das mit einer bestimmten Größe a multiplizierte k' einsetzen. Für Tabelle II kommen wir

also zu der allgemeinen Formel $A = k + a \cdot \frac{k}{\operatorname{tg} \alpha}$, wobei a 0,5 bei Verschiebung des Mittelfadens nach vorn, 0,31 bei einer solchen nach hinten bedeutet. Der Schwellenabstand ist demnach umgekehrt proportional zum tg des Winkels, den die Fäden mit der (horizontalen) Verbindungslinie der Augen bilden, also am kleinsten, wenn sie senkrecht stehen. Bei ihrer Horizontalstellung würde A also theoretisch unendlich, d. h. man könnte bei dieser Anordnung infolge der nicht erkennbaren Querdissipation keine Tiefe wahrnehmen. Die von *Gaus* für seine Versuche gefundene Formel $A = \frac{k}{\sin \alpha}$ wird, wie man aus den Größen der Tabelle II ersehen kann, den Verhältnissen weniger gerecht.

3. Versuchsanordnung: Gleitmethode nach *Monje* (gleitende Veränderung des Winkels bei konstantem Tiefenabstand des Mittelfadens).

In Tabelle III sind die Werte zusammengestellt, die wir mit der Gleitmethode von *Monje* erhielten. Es wurden hier für die Abstände 10 mm, 7,5 mm, 5 mm, 2,5 mm und 1 mm nach vorn und hinten in beliebiger Reihenfolge je 10 Bestimmungen gemacht und die Mittelwerte zusammengestellt. Wie bei den übrigen Versuchen betrachteten die VP. auf Aufforderung hin die Mitte des horizontalen Mittelfadens, der um einen bestimmten Abstand nach vorn oder hinten verschoben war. Hierauf wurde mit der Drehung der in 360° eingeteilten Scheibe aus der horizontalen Lage der Fäden begonnen und, sobald der Explorand die Schwelle mit «vorn»

TABELLE III.

Schwellenwerte im direkten Sehen bei gleitender Drehung der Fäden aus der Horizontalen (Gleitmethode nach Monje). Mittelwerte aus je 10 Vorn- und Hintenstellungen.

VP.	Hell									
	Vorn					Hinten				
	mm 1 Grad	mm 2,5 Grad	mm 5 Grad	mm 7,5 Grad	mm 10 Grad	mm 1 Grad	mm 2,5 Grad	mm 5 Grad	mm 7,5 Grad	mm 10 Grad
1.	33,7	13,9	10,9	8,8	7,8	26,8	16,2	10,5	9,5	7,75
2.	—	8,4	4,5	3,8	4,4	—	8,5	3,7	3,2	4,0
3.	—	11,6	7,0	5,0	3,6	—	14,8	10,3	5,5	4,2
4.	35,8	14,1	9,9	10,2	9,0	10,0	10,1	9,8	8,6	9,6
5.	33,5	10,1	6,2	6,1	4,1	17,2	9,4	6,3	6,1	4,1
6.	35,0	8,5	5,3	3,7	3,5	35,5	6,5	5,8	4,0	4,0
7.	57,9	16,8	7,6	7,8	5,6	45,8	12,6	7,8	6,7	5,1
8.	23,8	13,1	7,8	7,6	6,7	38,5	17,0	10,8	9,1	6,9
9.	25,3	8,2	8,2	6,9	5,7	17,6	7,7	6,6	7,2	5,5
10.	20,2	6,0	3,4	3,4	2,5	20,3	12,6	6,7	5,0	5,0
12.	—	15,2	12,3	9,6	10,3	—	21,3	10,0	7,6	10,2
M.	31,4	11,1	7,3	7,28	4,7	24,9	12,8	7,9	6,9	6,1
Dunkel										
1.	54,0	36,4	21,0	19,5	15,6	59,6	34,9	22,4	18,8	15,6
2.	—	22,5	19,0	16,0	17,5	—	24,8	16,4	18,6	14,1
3.	33,7	26,1	16,9	14,9	12,2	—u—	32,1	18,6	18,5	13,3
4.	21,8	15,4	23,0	13,7	11,6	27,1	13,0	13,8	13,3	12,7
5.	30,1	29,1	19,0	16,1	16,4	25,1	24,7	17,9	13,1	12,2
6.	20,3	18,3	14,2	13,8	11,0	30,7	18,3	17,5	15,8	10,9
7.	—u—	58,8	39,3	28,4	23,9	—u—	52,6	27,6	24,2	20,2
8.	68,3	48,4	29,1	24,6	20,4	73,9	51,7	36,7	30,8	26,5
9.	53,5	22,4	18,2	14,1	13,8	46,6	26,2	17,9	16,6	13,4
10.	72,9	44,7	30,0	23,6	25,6	67,7	39,3	33,1	29,6	21,5
12.	—	40,0	14,7	15,3	18,0	—	31,7	31,3	23,5	22,7
M.	45,85	32,6	22,75	18,4	16,9	48,0	32,2	22,5	20,1	16,2
—u— = unterschwellige Werte. (Die Schwelle konnte auch bei maximaler Verschiebung [12 mm] nicht erreicht werden.)										
— = Keine Versuche.										
Q.	1,46	2,95	3,11	2,52	3,58	1,93	2,53	2,84	3,05	2,67

oder «hinten» angab, der entsprechende Winkel abgelesen. Wir unterschieden zwischen Rechts- (die Uhrzeigerrichtung von der VP. aus) und Linksdrehung. Da die ganze Versuchsreihe 2 bis 2½ Stunden dauerte, machten wir, um eine starke Ermüdung der VP. zu vermeiden, gewöhnlich 2 Sitzungen mit je etwa gleichviel Hell- und Dunkelversuchen.

Trotzdem theoretisch bei Horizontalstellung die Querdissparation wegen Homogenität der einzelnen Punkte des Fadens nicht erkannt und demnach kein stereoskopischer Effekt erzeugt werden sollte, wurde durchschnittlich doch schon bei einem Tiefenabstand von 5 mm die Verschiebung bemerkt. Allerdings ist dieser Eindruck unsicher, schwindet nach längerer Fixation und wurde, wie eine oberflächliche Prüfung ergab, in ca. $\frac{1}{3}$ der Fälle falsch gedeutet. Der Grund dafür dürfte wohl in der Tatsache liegen, daß beim Blick auf die Fäden durch die dabei auftretende Augenbewegung eine parallaxtische Verschiebung stattfindet, wodurch die Tiefe erkannt wird. Cyclophorie soll nach Untersuchungen von *Gaus* keine Rolle spielen. Ein ähnlicher unklarer Tiefeneindruck entstand ebenfalls bei den kleineren Abständen unmittelbar vor der Erreichung des Schwellenwinkels. In beiden Fällen wurde er dann bei einer Erhöhung des Winkels plötzlich deutlich und annähernd schätzbar. Wir hielten die VP. an, diesen Moment abzuwarten und die Stellung erst anzugeben, wenn ein deutlich wahrnehmbarer Tiefeneindruck vorhanden sei. Dies ist bei größeren Tiefenabständen der Fäden ziemlich einfach, bedeutend schwieriger jedoch bei 1 mm Verschiebung, da hier die Schwelle nur ganz allmählich, stark abhängig von der Gleitgeschwindigkeit hervortritt, und demgemäß in der relativ langen, unsichern Vorphase Momente wie parallaxtische Verschiebung durch Augenbewegungen, Augenschließen und wiederöffnen, und damit Erkennen von kleineren Schwellen (Stufenmethode), psychische Einflüsse wie Erwartung, Perseveration für die Beurteilung eine entscheidende Rolle spielen können. Im ganzen kann man sagen, daß die Schwellenwerte bei 1 mm Verschiebung insbesondere für die Dunkelversuche zu klein sind, eine Tatsache, die auch ersichtlich ist aus den bei dieser Stellung häufig auftretenden Verkennungen (29) oder Nichterkennungen infolge Unterschwelligkeit (28), was bei 180 Versuchen also etwa einem Drittel entsprechen dürfte. Umgekehrt sind die Werte bei den großen Abständen infolge «leichtsinniger» Einstellung eher zu hoch ausgefallen. Wir können demnach die Resultate der Tabelle III etwas dahin korrigieren, daß sie sich denjenigen der Tabelle II angleichen.

Wenn wir diese Verhältnisse zusammen mit denjenigen von Tabelle II in ein gemeinsames Koordinatensystem (Fig. 1) auftragen, so sehen wir, daß die beiden Kurven nicht parallel ver-

laufen, sondern sich — bei Dunkelheit für Vorn- und Hintenstellung ungefähr am gleichen Punkt (4,5 mm 25°) — schneiden. Den beiden Kurven liegen die Resultate bei Vornstellung des Mittelfadens und Dunkeladaptation zugrunde. Doch zeigt sich

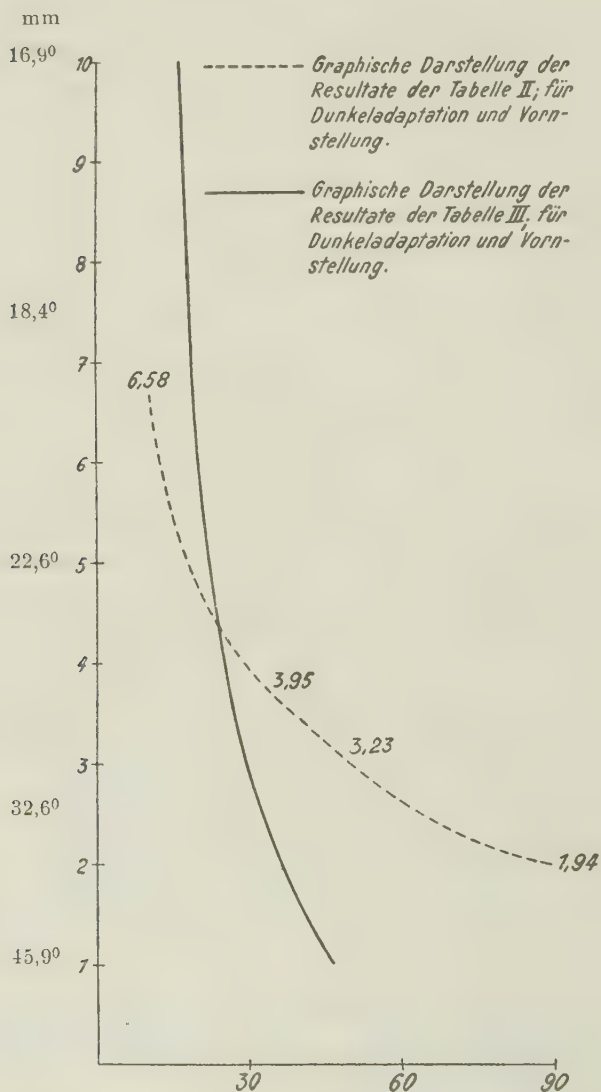


Fig. 1. Die längs der gestrichelten Kurve angegebenen Zahlen sind die Fadenabstände für Tab. II bei Winkeln von 90°, 45°, 30°, 10° u. Vornstellung. Dunkeladaptation.

auch bei den Hellversuchen und Hintenstellungen das nämliche Verhalten. Wenn man auch berücksichtigt, daß die genannten sekundären Einflüsse in Tab. II bei kleinem Winkel die Schwelle, in Tab. III bei minimalen Abständen die Winkel etwas verkleinert, bzw. bei groß gewählten Verschiebungen, infolge «unkonzentrierter» Einstellung vergrößert haben und sich demnach die Kurven bei Wegfall dieser Momente angleichen würden, so besteht dennoch zwischen ihnen eine Differenz, die klarmacht, daß es sich da um zwei Methoden mit zwei verschiedenen Gesetzmäßigkeiten handelt. Der hauptsächliche Unterschied, den die Kurve der Tab. III gegenüber derjenigen von Tab. II aufweist, ist erstens der steilere Anstieg und zweitens die bei den Dunkelversuchen zum Ausdruck kommende Erkennung von kleineren Schwellen.

Die größere Steilheit bedeutet, daß der Drehungswinkel viel weniger mit dem Abstand variiert, als das für diesen bei verschiedenen konstant gewählten Winkeln der Fall ist. Die Schwelle zeigt also eine stärkere Beeinflußbarkeit, wenn wir bei verschiedenen Winkelstellungen den Fadenabstand gleitend vergrößern, als wenn wir bei bestimmtem Abstand den Winkel erhöhen. Der Unterschied in der Bildung des stereoskopischen Effektes zwischen den beiden Methoden ist der, daß dieser bei Tabelle II durch allmähliche Vergrößerung des Querdiparationswinkels von Null zur Grenze erzeugt wird, während er im zweiten Fall schon vorhanden ist und durch die Drehung lediglich noch zum Erkennen gebracht werden muß. Daß die Schwelle hauptsächlich bei den Dunkelversuchen augenscheinlich niedriger wird und noch Abstände erkannt werden, die nach der Methode 1 (Tab. II) untersehwellig sind, ist eine Tatsache, für die wir keine plausible Erklärung finden können.

Vergleichen wir unsere Resultate mit denjenigen von *Monje* und *Gaus* (Tab. VII), die mit der gleichen Methodik und unter annähernd gleichen Bedingungen gewonnen wurden, dann sehen wir, daß der erste Autor ungefähr die gleichen Werte wie wir, *Gaus* hingegen etwas kleinere erhalten hat. Man erkennt auch aus dem Verlauf der aus der Tab. III gewonnenen Kurve, daß die Resultate mehr mit der Formel $A = \frac{k}{\sin \alpha}$ und damit mit den Angaben von *Gaus* und unsern eigenen theoretischen Überlegungen übereinstimmen, als mit der für Tab. II gefundenen

($A = k + a \cdot \frac{k}{\operatorname{tg} \alpha}$). Allerdings ist eine definitive Beurteilung schwierig, da bei den kleinen Winkeln, um die es sich hier hauptsächlich handelt, die Sinus- und Tangens-, folglich auch ihre reziproken Werte sich sehr nahekommen.

Versuche bei exzentrischem Sehen.

Da wir infolge der Stäbchenarmut des Zentrums bei Dunkelheit in einem Ringbezirk von 15—25° um die Fovea herum die niedrigste Schwelle für Lichtempfindung haben, ist es wahrscheinlich, daß bei Dunkeladaptation die Tiefen- wie natürlich auch die angulare Sehschärfe eine Funktion dieser parazentralen Netzhautbezirke ist. Dafür sprechen auch die Beobachtungen von *Streckfuß*, der zum Schlusse kommt, daß bei schwellennaher Lichtintensität, also mit einer Beleuchtungsstärke, bei welcher die Fäden eben noch erkannt werden können, parazentral, bei höheren Lichtintensitäten eher zentral beobachtet wird. Ob allerdings in diesem letzten Fall bei seinen Versuchen die Dunkeladaptation, die bekanntlich bei steigender Beleuchtungsstärke sehr schnell wieder durch die Helladaptation abgelöst wird, noch vollständig vorhanden war, sei dahingestellt. Außerdem fand er, daß bei zentraler Beobachtung des dunkeladaptierten Auges (Vorschalten einer künstlichen Pupille mit 1,5° Gesichtswinkel) die *absolute Schwelle* (eben wahrnehmbare Lichtstärke) zehnmal höher, die *relative* (minimale Lichtintensität zur Wahrnehmung der Fäden) sogar zwanzigmal größer sein mußte, als das bei Weglassung dieser, das Gesichtsfeld einschränkenden Vorschaltung der Fall war. Da nun — immer nach diesem Autor — ein Tiefenabstand im besten Fall erst bei doppelter Schwellenintensität erkannt wird, müßten wir demnach für das foveale Sehen wenigstens 40mal höhere Lichtstärken verwenden. Weil wir in unseren Versuchen aber ziemlich an der Grenze der Farbensichtbarkeit arbeiteten, konnten die Abstände foveal gar nicht erkannt werden.

Die Tiefenschwellen der parazentralen Netzhautbezirke hat neben *Gaus* allein *v. Kries* in einer größeren Arbeit untersucht. Es war deshalb für uns interessant, durch eigene Bestimmungen Vergleichsmöglichkeiten zu den Resultaten dieser Autoren zu gewinnen, vor allem aber, die Veränderung der Schwelle bei Hell- und Dunkelbeleuchtung für diese Gebiete zu studieren.

Nagel, der außer *Streckfuß* Versuche über das stereoskopische Sehen bei Dunkeladaptation angestellt hatte, bekam, wie aus Tabelle VII ersichtlich ist, als Schwellenwert bei seinen Dunkelversuchen 10 bis 12 mm. Das gleiche Resultat erhielt er nun auch, wenn er seine VP. unzulänglich korrigierte, so daß sie nur

TABELLE IV.

Schwellenwerte im exzentrischen Sehen bei gleitender Verschiebung des senkrechten Mittelfadens (Methode nach Hering). Mittelwerte aus je 50 Vorn- und Hintenstellungen.

Exzentrizität 6° 17'			Hell		Dunkel	
VP.			Vorn	Hinten	Vorn	Hinten
			mm	mm	mm	mm
1.	S.	20 J. w.	1,44	1,52	2,30	2,21
5.	K.	25 J. w.	1,80	1,74	2,13	2,0
6.	Gu.	27 J. m.	1,18	1,40	1,84	2,02
8.	Ga.	29 J. m.	1,27	1,68	2,56	3,46
9.	St.	36 J. w.	1,59	1,61	3,22	4,38
11.	B.	45 J. w.	1,06	1,21	2,93	4,34
Mittelwerte:			1,41	1,55	2,36	2,80
Quot.			Dunkelschwelle		1,67	
			Hellschwelle		vorn	
					1,81	
					hinten	

ein Fünftel bis ein Zehntel ihrer bei vollständiger Korrektur vorhandenen Sehschärfe besaßen. Da nach *Hofmann* die angulare Sehschärfe (S.) in dem Ringbezirk, der bei Dunkeladaptation die größte Empfindlichkeit aufweist, nur noch ein Fünftel bis ein Zehntel der zentralen beträgt, wäre also nach diesen Ergebnissen die Erhöhung der Schwelle bei den Dunkelversuchen vielleicht lediglich durch die herabgesetzte Sehschärfe bedingt.

v. Kries, der die parazentralen Netzhautteile auf ihre Tiefenschärfe (T.) hin untersuchte, fand, daß bei 5° Exzentrizität diese $\frac{1}{15}$ bis $\frac{1}{30}$ der zentralen Werte betrug. Nach ihm würde demnach T. mit steigender Intensität rascher abfallen als S., denn für diese findet sich bei den gleichen Bedingungen nur eine Verminderung um das Drei- bzw. Fünffache. Auch *Gaus* fand mit steigender Exzentrizität einen höheren Winkel; doch lassen sich seine Resultate nicht unmittelbar mit denjenigen von *v. Kries* und den unsrigen vergleichen, da *Gaus* nach der Drehmethode von *Monje* arbeitete, im Gegensatz zu den andern Autoren, die ihre Ergebnisse durch Verschiebung des Mittelfadens bei senkrechter Stellung erhielten (*Heringsche* Stäbchenmethode).

Bei der praktischen Bestimmung der S. wird nun nicht der

Brennpunktswinkel ω gemessen, sondern dessen Tangens, der dem Abstand entspricht, den zwei Punkte voneinander haben, die eben noch als zwei getrennte empfunden werden. Da es sich um kleine Winkel handelt, ist der Fehler sehr klein. In Anlehnung daran können wir statt q den gefundenen Tiefenabstand

k einsetzen, die Tiefensehschärfe als $\frac{c}{k}$ definieren, wobei c (Kon-

stante) mit dem Apparat und damit dem Abstand der Fäden von der VP. verschieden zu wählen wäre, und durch Ersetzung von q und Q mit k bzw. A die Formel in die *Gaussche* Fassung bringen

$$A = \frac{k}{\sin \alpha}.$$

In unsern eigenen Versuchen wählten wir die für das Gesichtsfeld maximale Exzentrizität von $6,3^\circ$ vom Zentrum des Mittelfadens aus gerechnet, indem wir in der Fadenebene senkrecht zur Fadenrichtung am rechten Rand des Scheibenausschnittes als Marke ein an seinem Ende durchlochstes Metallstäbchen anbrachten (s. hierzu *Gaus*, *Ophthalmologica* Vol. 112, Nr. 4/5 [1946]). Während nun die VP. diese zu fixieren hatte, bestimmten wir die Schwelle, die sich bei gleitender Verschiebung des Mittelfadens von der Nullstellung nach vorn oder hinten ergab. Durchschnittlich machten wir für beide Verschiebungen bei Hell- und Dunkelbeleuchtung mit jedem der 6 Exploranden etwa 50 Versuche, so daß die 4 Mittelwerte also das Resultat von je 200 bis 250 Bestimmungen sind. Dabei ergab sich die Notwendigkeit einer vorherigen Übung. Wenn sich nämlich das Interesse der VP. allzu stark auf den Fixationspunkt richtete, so wurde die Schwelle, sofern überhaupt eine solche wahrgenommen werden konnte, offenbar infolge psychischer Verdrängung, sehr hoch. Sie sank dann nach einigen Vorversuchen ziemlich rasch, sobald sich der Explorand geübt hatte, die Eindrücke der parazentralen Retinabezirke neben den zentralen zu beobachten und damit bewußt werden zu lassen.

Nach unserer Erfahrung scheint es, daß diese Gewöhnung mit dem Alter schwieriger wird, denn wenn wir den Quotienten (Dunkelschwelle/Hellschwelle) in Tab. IV etwas näher betrachten, so sehen wir, daß dieser mit steigendem Alter der VP. größer wird, also die Werte bei Dunkelbeleuchtung, wo die parazentrale Beobachtung entsprechend schwieriger ist, relativ stärker ansteigen als bei den jungen Versuchspersonen. Übereinstimmend geben alle VP. an, daß der Tiefeneindruck insbesondere bei Helladapta-

tion ganz plötzlich entstehe, während er bei Dunkelheit erst nach Durchlaufen einer unklaren Vorstufe deutlich werde, er demnach ein ähnliches Verhalten zeigt, wie bei den Dunkelversuchen mit zentraler Fixation. Daß dieser plötzlich entstehende stereoskopische Effekt durch unbewußte Bewegungen der Augen vom Fixationspunkt zur Fadenmitte bedingt wäre, ist unwahrscheinlich, denn es dürfte kaum zu erklären sein, warum die VP. diese Bewegung immer ungefähr bei der gleichen Tiefenverschiebung gemacht hätten. Eventuell könnte die mit dem Alter physiologischerweise auftretende Miosis eine gewisse Rolle spielen. Ferner konnten wir auch feststellen, daß neben dem Alter sekundäre Einflüsse, wie Erwartung, Müdigkeit usw., hier eine größere Rolle spielen, als dies für das zentrale Sehen der Fall ist.

Die Ergebnisse, die in Tabelle IV zusammengestellt sind, zeigen, daß die Schwelle bei Helligkeit um das zwei- bis dreifache der Werte bei zentraler Fixation ansteigt, während sie bei den Dunkelversuchen keine, oder jedenfalls eine nur unwesentliche Veränderung erfährt.

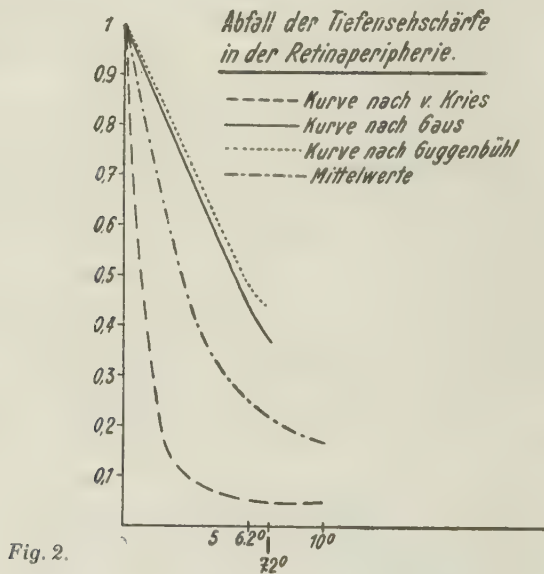
Um in das Absinken der T. in exzentrischen Netzhautteilen genaueren Einblick zu bekommen, haben wir in Tab. V die Resultate der bisherigen Untersuchungen zusammengestellt, deren q ausgerechnet und in ein gleiches Koordinatensystem gebracht, wie es *Hofmann* für die Darstellung der angularen Sehschärfe

TABELLE V.

Zusammenfassung der Resultate der verschiedenen Autoren für das exzentrische Sehen und Berechnung des zugehörigen, halben Grenzünerdisparationswinkels q .

Methode	Exz. Grad	Abst. mm	Bel.	Stell.	v. Kries mm	Gugg. mm	Gaus Grad	q Sek.
	5		hell		27,9			50,2
Stäbchen- Methode nach <i>Hering</i>	6,17	{	hell	vorn		1,41		25
				hinten		1,55		28
			dunkel	vorn		2,36		42
				hinten		2,8		50
	10		hell		16,6			63,1
Gleit- Methode nach <i>Monje</i>	5	{	2,5	hell			9,4	7,2
				hinten			10,5	8,0
			5	hell			6,1	9,3
				hinten			7,3	10,8
	7,2	{	hell	vorn			8,3	12,7
				hinten			8,6	13,5

verwendet hat, indem wir auf der Ordinate die T. in Zehnteln der zugehörigen zentralen, und auf der Abszisse die Exzentrizität, mit der beobachtet wurde, auftrugen (s. Fig. 2). Wie man sieht, liegen unsere Werte ungefähr in der Höhe der von *Gaus* gefundenen, während diejenigen, die *v. Kries* angibt, bedeutend niedriger sind. Nehmen wir, wie das auf Fig. 2 gemacht wurde, aus den beiden differierenden Kurven das arithmetische Mittel, so erhalten wir Ordinatenpunkte, die ziemlich genau mit denjenigen für *S.* übereinstimmen. Wir beobachten nämlich bei 5° Exzentrizität ein Ab-



	Zentral		5°	$6,2^{\circ}$	$7,2^{\circ}$	10°
<i>v. Kries</i>	q''	$3,3''$	$50,2''$			$63,1''$
	$3,3/q''$	<u>1</u>	<u>0,066</u>			<u>0,052</u>
<i>Gaus</i>	q''	$5''$	$8,9''$		$13,1''$	
	$5/q''$	<u>1</u>	<u>0,57</u>		<u>0,37</u>	
<i>Guggenbühl</i>	q''	$12,7''$		$26,5''$		
	$12,7/q''$	<u>1</u>		<u>0,48</u>		
	c/q Mittel	<u>6</u>	<u>0,32</u>	<u>0,25</u>	<u>0,21</u>	<u>0,17</u>

Die Unterstreichungen beziehen sich auf die entsprechenden Kurven in Fig. 2.

fallen der T. auf ca. einen Drittel, bei 10° ein solches auf ca. einen Sechstel. Die T. fällt also mit steigender Exzentrität nicht, wie v. Kries fand, rascher als die angulare Sehschärfe, sondern etwa parallel zu dieser. Auch Gaus konnte das gleiche Verhalten feststellen, indem er nämlich bei der Projektion der Punkte gleicher Sehschärfe auf die Retina für S. und T. ungefähr die gleichen und parallel verlaufenden Kurven bekam. Es bestehen demnach innige Beziehungen zwischen Tiefen- und angularer Sehschärfe.

Daß die Schwellen bei Dunkelheit denjenigen der zentralen Fixation ungefähr gleich sind, ist wohl der Beweis dafür, daß bei der relativen Unterschwelligkeit des fovealen Bezirkes, auch bei zentraler Beobachtung, die Abstände durch diese parazentralen Bezirke erkannt wurden. Daß sie höher sind, als die bei Helladaptation gefundenen Werte zeigt, daß das stereoskopische Sehen bei Dunkelheit nicht nur eine Folge der dabei stattfindenden parazentralen Perzeption und damit der abnehmenden Sehschärfe ist, sondern wir kommen mit *Streckfuß* zum Schluß, daß bei Dämmerung das T. (und auch S.) durch andere Elemente garantiert wird, die kein so feines Differenzierungsvermögen besitzen wie diejenigen, die bei helladaptiertem Auge diese Funktion übernehmen. Nach der Duplizitätstheorie wären das demnach bei Helligkeit die Zapfen, bei Dunkelheit die Stäbchen.

Diese Schwellendifferenz der beiden Adaptationszustände, die in unsern Versuchen wohl etwas zu groß ist, infolge Erhöhung der Dunkelschwelle durch die minimale Beleuchtung (*Streckfuß*, *Fruböse* und *Jaensch*: Der Einfluß der verschiedenen Faktoren auf die Sehschärfe), würde aber nach dem erstgenannten Autor auch nicht aufgehoben bei Erhöhung der Lichtstärke bis zur optimalen Intensität und dürfte wohl durch die von *Saubermann* festgestellte Abnahme der Helligkeitsunterschiedsschwellen des dunkeladaptierten Auges gegenüber dem helladaptierten bis zu einem gewissen Grade bedingt sein.

Zusammenfassend könnte man also sagen, daß die Zapfen ein 1,5fach besseres Tiefenempfinden vermitteln als die Stäbchen der gleichen Region. Die Gesamtdifferenz der Hell-Dunkel-Schwellen bei zentraler Fixation würde sich demnach zur einen Hälfte aus dem Perzeptionsunterschied zwischen Stäbchen und Zapfen des gleichen Bezirkes, zur andern aus der Tatsache zusammensetzen, daß im Hellen nicht mehr parazentral, sondern mit

der fovealen (Zapfen) Partie der Netzhaut stereoskopisch gesehen wird, also mit einem Teil, in welchem die Sehschärfe höher, die Schwelle dementsprechend kleiner ist.

Spezielles.

Um die Frage der *Übung*, die nach *Gaus* und *Hofmann* einen Einfluß haben soll, etwas abzuklären, berechneten wir für die Tabelle I die Mittelwerte aus je 10 aufeinanderfolgenden Versuchen und stellten diese chronologisch geordnet für alle VP. zusammen. Während man bei den Hellversuchen bei Vornstellung außer einem geringgradigen Ansteigen der Schwelle nach 30—40 Versuchen ungefähr überall die gleichen Werte beobachten kann, erkennt man bei den Hinterverschiebungen ein Absinken derselben. Hier würde also infolge der für die meisten VP. schwereren Einstellung eine Übung zum Ausdruck kommen. Eine solche läßt sich bei den Dunkelversuchen erst gegen das Ende hin, also nach etwa 40—50 Bestimmungen nachweisen. Hier steigen nämlich die Werte langsam kontinuierlich bis zum vierten Mittelwert an, was wohl durch eine gewisse Ermüdung der VP. bedingt ist. — Die Übung hat einen um so größeren Einfluß auf die Resultate, je schwieriger die Einstellung ist. So mußten wir insbesondere für die 10°-Winkel bei Tab. II, für die 1-mm-Abstände der Tab. III sowie für das indirekte Sehen bei den Hell-, hauptsächlich aber bei den Dunkelversuchen eigentliche Vorversuche machen, bevor die Resultate annähernd konstant wurden.

Die *Disposition*, die nach *Gaus* keine, nach *Monje* eine gewisse Rolle spielen soll, äußert sich, wie wir schon erwähnt haben, ebenfalls dort in bemerkenswerter Weise, wo das Erkennen der Schwelle infolge der Versuchsbedingungen erschwert ist, also bei den Dunkelversuchen fast regelmäßig, bei denjenigen der Hellversuche nur bei kleinen Winkeln, bzw. Abständen.

Vergleichen wir die Resultate der beiden *Adaptationszustände* miteinander, indem wir die Hellschwellen mit dem zugehörigen Quotienten (Dunkelschwelle/Hellschwelle) multiplizieren, sehen wir eine Parallelität, die sich bis auf die kleinen Winkel (Tab. II) bzw. die 1-mm-Abstände (Tab. III) erstreckt, wo die Werte dann stark streuen. Es hängt dies ab, wie wir schon bei der Besprechung der verschiedenen Tabellen bemerkt haben, von der bei schwierigen Einstellungen, also hauptsächlich bei Dunkelheit, größeren Beeinflussung der Schwellen durch sekundäre Faktoren, welche die VP. veranlassen, vor dem deutlichen Tiefeneindruck auf Grund einer vagen Empfindung die Schwellen anzugeben, was die Werte, insbesondere bei Dunkelheit, wesentlich verkleinern dürfte. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache sehen wir, daß der Quotient bei jeder Änderung der Bedingungen durch verschiedene Winkelstellungen der gleiche bleibt, die Tiefensehschärfe des dunkeladaptierten Auges also das nämliche Verhalten wie diejenige des helladaptierten zeigt.

Das *Alter* ist für die Tiefensehschärfe wohl nicht von Bedeutung. Es sind, wie schon gesagt, unsere VP. in den Tabellen nach ihrem Alter geordnet, doch läßt sich kein entsprechendes Ansteigen der Schwelle beobachten. Vielleicht scheint sich diese von ca. 40 Jahren an bei der Dunkeladaptation nachteilig auszuwirken, sofern es überhaupt erlaubt ist, aus der Tatsache, daß wir für VP. 10 und 11, die beide über 40 Jahre alt sind, als einzigen neben

dem farbenschwachen Exploranden 8 und dem brillentragenden Ro. die Dunkelbeleuchtung etwas gegenüber den andern VP. heraufsetzen mußten, eine Gesetzmäßigkeit abzuleiten.

Was die *Differenz zwischen Vorn- und Hintenstellung* anbelangt, so können wir sagen, daß diese bei der *Heringschen* Methode durchwegs, auch unter Veränderung des Winkels vorhanden ist, hingegen beim Drehen nach *Monje* nicht oder doch nur undeutlich zutage tritt. Die Ursache des verschiedenen Verhaltens mag wohl daran liegen, daß bei Tab. III die Querdissipation, die ja mit dem Sinus des Drehungswinkels ansteigt, schon bei geringer Änderung des Winkels stärker zunimmt, so daß die Differenz zwischen vorn und hinten in dem relativ zur Querdissipation nur wenig variierenden Winkel kaum zur Wirkung kommt und noch vollends durch die bei dieser Methode größere Streuung verdeckt wird. Aus dem gleichen Grunde hat wohl auch *Monje* eine Differenz zwischen Vorn- und Hintenstellung verneint.

Wie schon gesagt, soll dieser Unterschied nach *Hofmann* auf Anomalien der Netzhautkorrespondenz beruhen. Wenn wir die Abbildungsvorgänge näher betrachten, so zeigt sich, daß bei Vornverschiebung des vom Beobachter fixierten Mittelfadens die Seitenfäden sich relativ nach hinten bewegen und infolgedessen eine binasale Querdissipation auftritt, bei Hintenstellung eine bitemporale, wobei binasal und bitemporal nicht etwa heißt, daß die Querdissipation in den Bereich dieser Retinahälften fällt, sondern damit ist lediglich die Richtung der Verschiebung angegeben. So kann eine binasale, wie das z. B. bei der exzentrischen Fixation deutlich wird, in einem Auge auf der nasalen Netzhautseite im andern auf der temporalen (Richtung nasal) vorhanden sein, sich also sozusagen in jedem beliebigen Bezirk der Retina befinden. Daß dabei Netzhautasymmetrien die Ursache sein sollen, ist bei dieser Betrachtung kaum verständlich. Hingegen scheint die Erklärung plausibel, daß die Richtungsverschiedenheit der Querdissipation, die ja wohl das Ausschlaggebende für das Zustandekommen der Differenz ist, sich in Form einer mehr oder weniger großen Tiefenschärfe auswirkt. Daß dieses Verhältnis bei Dunkelheit nicht wesentlich verändert wird, beweisen neben den bei Hell und Dunkel ungefähr gleich großen Differenzen auch die Ergebnisse der Nullstellungen. Während nämlich bei Helligkeit von insgesamt 402 Einstellungen 87 nach vorn und 36 nach hinten verkannt wurden, sind es beim Dämmerungssehen deren 145 bzw. 70. Man sieht also, daß die Fehlbestimmungen mit der Dunkelheit prozentual anwachsen, und zwar so, daß dabei das Verhältnis zwischen vorn und hinten ungefähr gewahrt bleibt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich sekundäre Einflüsse, wie Ermüdung, Disposition, Erwartung, Haftung des stereoskopischen Eindrucks und Gleitgeschwindigkeit, jedes für sich bei der Schwierigkeit der Einstellung bemerkbar machen.

In Tab. VI sind zum Zwecke einer allgemeinen Übersicht die Versuchsanordnungen der verschiedenen Autoren zusammengestellt, dann mit Hilfe der darin angegebenen Größen (Fadenabstand, Distanz der VP.-Fadenebene) und der mitgeteilten Schwellen diese durch Berechnung des Querdissipationswinkels

TABELLE VI.

Zusammenfassung der Versuchsanordnungen der verschiedenen Autoren.

	Nagel	Monje		Gaus	v. Kries	Streckf.	Gugg.
		I	II		1) Zentr. 2) 5° Exz. 3) 10°		
Abstand	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
VP.-Fadenebene	225	45,0	34,0	34,0	1) 500 2) 300 3) 150	33,6	34,0
VP.-Gesichtsfeld		30,5	30,5	32,0			32,0
Faden-Opalglas		1,5	2,0			0,6	8,0
Faden-Gesichtsf.			3,5	2			2
Gesichtsfeld		3,4 ø	3,4 ø	8,3 ø	20 : 8,2	3,5 ø	8,0 ø
Faden-Abstand	5,0	1,0	1,0	1,0		1,0	1,0
Fadendicke		0,1	0,1	0,03	ca. 0,3	0,1	0,03
Querspalt		1 : 10	1 : 10	1 : 10		0,35	1 : 10
Gesichtswinkel					1) 1° 2) 1° 48' 3) 3° 36'		1° 41'

(q) auf einen gemeinsamen und vergleichbaren Nenner gebracht (Tabelle VI und VII), wobei wir dann jeweils bei der Methode nach *Monje* die gefundenen Werte noch mit dem Sinus des Drehungswinkels multiplizieren mußten nach der bereits mehrfach erwähnten Formel $q = Q \cdot \sin a$. Die Ergebnisse sind eigenartig. Während zwischen den Werten von *Monje* und den unsrigen sowohl in bezug auf Winkel wie Querdisparation Übereinstimmung besteht, sind diejenigen von *Nagel*, *v. Kries*, *Gaus* und *Streckfuß* um ca. die Hälfte bis dreimal niedriger. Die sehr kleinen Schwellen von *v. Kries* lassen sich nicht ohne weiteres erklären, jedoch ist die Ursache der Differenz bei *Gaus*, *Streckfuß* und wohl auch bei *Nagel*, der nach der Versuchsanordnung *Herings* arbeitete, im Unterschied der Methodik zu suchen, indem nämlich hier die Stufenmethode, die ja nach *Gaus* eine zwei- bis dreimal feinere Tiefenschwelle hat, bei den andern Autoren aber die Gleitmethode benützt wurde. Der für ein Auge berechnete, also halbe Grenzquerdisparationswinkel beträgt demnach für die Stufenmethode bei Helligkeit 4—6'', bei Dunkelheit 9—24'', für die Gleitmethode bei Helligkeit 10—15'', bei Dunkelheit 36—61''.

Doch wie ersichtlich, ist der Quotient $\frac{\text{hell}}{\text{dunkel}}$ auf den es uns ja hauptsächlich ankommt, in jedem Fall 3 bis 4, d. h. die Dunkel-

schwelle ist übereinstimmend bei allen drei Autoren um das 3- bis 4fache höher als diejenige bei Helladaptation.

TABELLE VII.

Zusammenfassung der Resultate der verschiedenen Autoren für das zentrale Sehen und Berechnung des zugehörigen (halben) Grenzquerdisparationswinkels q .

I. Heringsche Methode.

	Nagel		v. Kries	Guggenbühl			
	Hell	Dunkel	Hell	Hell		Dunkel	
				vorn	hinten	vorn	hinten
k (mm)	3	10—12	6,2	0,57	0,85	2,58	3,42
q (")	6"	22"	3,3"	10"	15"	47"	61"

II. Monjesche Methode.

		Monje		Gaus	Streckfuß	Guggenbühl
A.		I	II			
		Grad (q'')	Grad (q'')	Grad (q'')	Grad (q'')	Grad (q'')
2,5	h. {v.	32,6 (9,9)	11,5 (8,8)	6,9 (5,3)	6 (4,7)	11,1 (8,5)
	h. {h.				6 (4,7)	12,75 (9,7)
	d. {v.				12—32 (9,4—23,8)	32,6 (23,8)
	d. {h.				12—32 (9,4—23,8)	32,2 (23,3)
5	h. {v.	14,7 (12,7)	8,0 (12,2)	2,05 (3,1)		7,3 (11,4)
	h. {h.	15,9 (13,7)	8,5 (13,0)	3,7 (5,7)		7,9 (12,1)
	d. {v.					22,8 (43,1)
	d. {h.					22,5 (33,7)
7,5	h. {v.	12,1 (15,7)				7,28 (16,6)
	h. {h.	11,4 (13,0)				6,58 (15,0)
	d. {v.					18,4 (41,6)
	d. {h.					20,1 (45,4)
10	h. {v.	11,4 (19,8)				4,7 (12,8)
	h. {h.	9,8 (17,0)				6,1 (16,6)
	d. {v.					16,9 (45,3)
	d. {h.					16,2 (43,5)
q (M)	h. {v.	14,5	10,5	4,2	4,7	12,3
	h. {h.	14,1	11,0	5,9	4,7	13,4
	d. {v.				9,4—23,8	36,2
	d. {h.				9,4—23,8	36,5

Resultate.

Bei Versuchen über das Tiefsehen des hell- und dunkeladaptierten Auges ergab sich für die gewählten Versuchsbedingungen folgendes:

1. Für Helligkeit: Eine Schwelle für Vorn- und Hinterverschiebung von 0,57 mm bzw. 0,85 mm, was einem (halben) Grenzquerdisparationswinkel von 10'' bzw. 15'' entspricht.

2. Für Dunkelheit: 2,58 mm bzw. 3,42 mm, was umgerechnet einen Querdiseparationswinkel von 47'' bzw. 61'' ergibt. Wir haben bei Dunkelheit demnach einen ca. viermal größeren Schwellenwert als bei Helladaptation (zentrales Sehen).

3. Übung bewirkt eine Erniedrigung der Schwelle, hauptsächlich bei den Dunkelwerten. Damit sinkt auch der Quotient $\left(\frac{\text{Dunkelwerte}}{\text{Hellwerte}}\right)$ auf ca. 3.

4. Für Schwellenbestimmungen nach der *Heringschen* Methode, mit gleichzeitiger Veränderung des Winkels, den die Fäden mit der Horizontalen bilden, die Formel $A = k + a \cdot \frac{k}{\operatorname{tg} \alpha}$. A = Schwellenwert, bei welchem die Fäden in der zugehörigen Winkelstellung stereoskopisch verschoben gesehen werden; k = minimaler Abstand bei senkrechter Fadenstellung; a = Konstante; α = Drehungswinkel.

5. Für die Gleitmethode nach *Monje*, die von *Gaus* schon gefundene Formel $A = \frac{k}{\sin \alpha}$, Bezeichnungen siehe unter 4.

6. Daß die Differenzen der Werte zwischen Vorn- und Hintenstellung wohl nicht durch Asymmetrien der Netzhaut, sondern durch Richtungsverschiedenheit der Querdiseparation auf der Retina bedingt sind.

7. Abnahme des Tiefensehens in den exzentrischen Netzhautpartien gleichwie diejenige der angularen Sehschärfe.

In allen Fällen besteht eine Parallelität zwischen Hell- und Dunkelversuchen. Doch kommen bei den Dunkelversuchen sekundäre Einflüsse, wie Gleitgeschwindigkeit, Ermüdung, Disposition, Erwartung, Perseveration, viel stärker zur Geltung und machen sich insbesondere bei den kleinen Winkeln und kleinen Abständen, also bei schwierigen Bedingungen bemerkbar.

Es ist mir ein Bedürfnis, den Herren Dr. *G. Boehm* und Dr. *J. Gaus*, die mir bei der Zusammenstellung der Apparatur bereitwilligst ihre Unterstützung gewährten, meinen besten Dank auszusprechen.

Zusammenfassung.

Mit einer von *Monje* angegebenen Apparatur wurden Untersuchungen angestellt über das stereoskopische Sehen des hell- und dunkeladaptierten Auges für das zentrale und das exzentrische Sehen und die Resultate mit denjenigen anderer Autoren verglichen durch Berechnung mittels der gefundenen Formeln des zugehörigen halben Grenz-Querdisparationswinkels. Es zeigte sich dabei eine durchgehende Parallelität in bezug auf das Tiefensehen für beide Adaptationszustände bei einer für die Dunkelversuche etwa 3mal (Zentrales Sehen) bzw. 1,7mal (Exzentrisches Sehen) höheren Schwelle. Die Ergebnisse anderer Autoren konnten bestätigt und die vorhandenen Differenzen durch Vergleich der angewandten verschiedenen Methodik erklärt werden.

Die Tatsache, daß beim exzentrischen Sehen für die Versuche bei Tageslicht die Schwelle um das fast Dreifache anstieg, während sie für diejenigen bei Dunkelheit annähernd gleich blieb, stellt den Beweis dar, daß das Tiefensehen des dunkeladaptierten Auges eine Funktion der parazentralen Netzhautpartien ist. Ferner wurde durch Zusammenfassung der Versuchsergebnisse verschiedener Autoren ein Abfall der Tiefenseherschärfe gegen die Netzhautperipherie gefunden, der mit demjenigen der angularen Sehschärfe übereinstimmt.

Summary.

With an apparatus described by *Monje*, the author investigates the stereoscopic vision of light, as well as dark adapted eyes for central and excentric acuity. At the same time he compares the results with those of different authors by using the given formulae of the half border disparative angle. A complete parallelism was found relating to the stereoscopic vision for both states of adaptation, with a threshold for the dark tests ca. three times (central vision), and 1.7 times (excentric) higher. The results of other authors were approved and the differences found, explained by comparison of the different techniques. The fact, that in excentric vision the daylight tests showed the threshold increased nearly three times, whilst practically stationary in dark adaptation, proves that the stereoscopic vision of the dark-adapted eye is a function of the paracentral parts of the retina. In addition it was found that by comparison of the results of different authors, the decline of the stereoscopic vision

towards the retinal periphery was equal to the decline of the angular visual acuity.

Résumé.

Examen de la vision stéréoscopique centrale et périphérique de l'œil adapté à la lumière et à l'obscurité, au moyen du dispositif de *Monje*. Les formules établies à l'aide des demi-angles de limite de disparité correspondants permettent des calculs qui servent à comparer les résultats à ceux d'autres auteurs. Ils montrent un parallélisme continu dans la vision stéréoscopique aux deux états d'adaptation pour un seuil 3 fois plus élevé pour la vision centrale à 1,7 fois pour la vision périphérique dans les essais à l'obscurité. Les résultats d'autres auteurs sont confirmés et les différences expliquées par comparaison des différentes procédures.

Le fait que le seuil de vision périphérique triple environ dans les expériences à la lumière du jour alors qu'il ne change presque pas pour celles à l'obscurité, prouve que l'acuité visuelle de l'œil adapté à l'obscurité est une fonction des parties paracentrales de la rétine. De plus, l'étude des conclusions des différents auteurs montre que la vision stéréoscopique diminue d'acuité en allant vers la périphérie de la rétine, et cela d'une quantité correspondant à l'acuité visuelle angulaire.

Literatur.

- Brückner, A., und Meisner, W.*: Grundriß der Augenheilkunde, 2. Aufl. 1929. — *Dittler, R.*: Physiologie des optischen Raumsinnes, Kurzes Handbuch der Ophthalmologie II, S. 414. — *Gaus, S.*: Ophthalmologica Vol. 112, Nr. 4/5 (1946). — *Heinsius und Monje*: Ztschr. f. Sinnesphysiologie, 70, 1. — *Hering, E.*: Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges, Handbuch der Physiologie der Sinnesorgane von Hermann, I. Teil, S. 342; Handbuch der Physiologie, III. Bd., S. 542. — *Hofmann, F. B.*: Physiologische Optik, Lehre vom Raumsinn, Handbuch der gesamten Augenheilkunde von Graefe-Saemisch, III. Bd., Kap. 13. — *v. Kries*: Ztschr. f. Sinnesphysiol. 44, 165. — *Monje*: a. Ztschr. f. Sinnesphysiol. 69, 73; b. Ztschr. f. Sinnesphysiol. 69, 261. — *Müller, H. K.*: Theorien der Adaptation, Kurzes Handbuch der Ophthalmologie, Bd. II. — *Nagel, W. A.*: Ztschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 27 (1902), 264. — *Sauber-mann*, Unterschiedsempfindlichkeit des dunkeladaptierten Auges, Ophthalmologica 104, 157 (1942). — *Streckfuß, H. D.*: Tiefensehschärfe und Auflösungsvermögen bei Hell- und Dunkeladaptation, Diss. Leipzig 1943.